

用低阶模型参数检测平台损伤*

陈尔樱 田千里

(中国科学院力学研究所)

摘 要

检测海洋平台损伤是项极其重要的探索研究。本文对空间框架结构的平台计算了损伤前和五种损伤状态的前四十阶特征值和特征矢量,损伤前后的前9阶和后7阶振型均属局部振动,第10阶至第33阶是整体振动。损伤前后第1阶整体振动的固有频率变化很小,损伤后只减小1%左右,但是,第2阶的固有频率损伤后最大的减少达到35%,第6阶开始固有频率减少趋于变小。特征矢量 U_j 在损伤部位损伤前后只是第2阶有比较大的变化,其他各阶变化甚小,因此用第2阶的固有频率和特征矢量 U_j 可以检测损伤,文中用第1, 2, 3阶整体振动的振型经正规化后的特征参数检测损伤,第2阶的位移特征参数 U_j^* 在五种损伤状态检测能力都明显提高。同时还用第1、2阶整体振动的模态柔度比法检测损伤,得到五种损伤状态下第2阶的模态柔度比大大高于第1阶的模态柔度比的检测能力。因此提出用第2阶模型参数检测损伤更为有效。

一 引 言

由于平台在海洋中长期受风、波浪和冰排的作用,常常会使结构提前出现断裂面或裂纹,导致疲劳破坏,因此需要定期检测损伤。靠专业潜水员水下检查,既危险又有局限性,而且费用昂贵。采用振动检测的办法是根据平台动力特性的变化,从1960年起开始用频率参数识别,发展到近年来用柔度检测法。由于以往的频率检测和振型检测都只限于第一阶基频振型,认为频率和振型对结构损伤不敏感。1982年Rubin^[2]提出的柔度比法虽然是从第一阶基本振型出发但应用了差分,得出损伤后的柔度比变化比基频变化敏感多了。1985年M.M.F. Yuen^[3]提出用特征参数来判别,文中对损伤后悬臂梁的数值结果表明在损伤部位位移特征参数有突变,转角特征参数有跳跃。1985年S. Shyam Sunder^[4]提出的柔度比法,对平台简化模型列出模态柔度比和真实柔度比的计算结果,损伤前后在损伤位置的变化在10~20%的范围内。他们都是用第一阶模态计算的。

本文计算了空间框架结构平台损伤前后的前四十阶特征值和特征矢量,对各阶固有频率和低阶特征矢量作比较以说明损伤前后的变化;用第1、2、3阶振型经正规化后的特征参数检测损伤,并比较其检测能力;同时还用第1、2阶模态柔度比检测损伤,并进行比较。

二 平台模型和计算模态

三维空间框架结构平台按二维问题计算模态。 N 个自由度线性系统的运动方程为:

* 国家自然科学基金资助项目

$$[M][\ddot{x}(t)] + [C][\dot{x}(t)] + [K][x(t)] = [F] \quad (1)$$

当阻尼很小时可略去不计, 则方程(1)的数学形式:

$$[M][\ddot{x}(t)] + [K][x(t)] = [F] \quad (2)$$

结构模型为四层空间框架如图1所示, 它由L形截面和矩形截面的钢材焊接而成, 四根垂直构件和每层之间四周的构件为L形截面(2×2×0.2), 每层中的交叉构件为矩形截面(2.5×0.3), 底层的四条腿为L形截面(2×2×0.4), 以上单位均为厘米。空间框架结构在水平面上是方形, 且是双对称的, 图上标注的尺寸均是钢材重心之间的距离。

材料参数:

$$E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$\nu = 0.28$$

$$\rho = 7.8 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$$

$$\rho/g = 7.95 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}^4$$

众所周知, 有限元法计算复杂结构动态特性是一个可靠的方法, 可以达到足够的精度。本文用有限元法求解, 按平面问题计算空间框架结构的特征值和特征矢量, 得到前四十阶的固有频率和振型, 从特征矢量分析看出前9阶和第34阶至第40阶交叉点的位移相对其他各点都很大, 而整体位置的节点位移都很小, 属于局部振动, 第10阶至第33阶是结构的整体振动见图2。不同损伤状态下也计算了前四十阶的特征值和特征矢量, 得到的也是

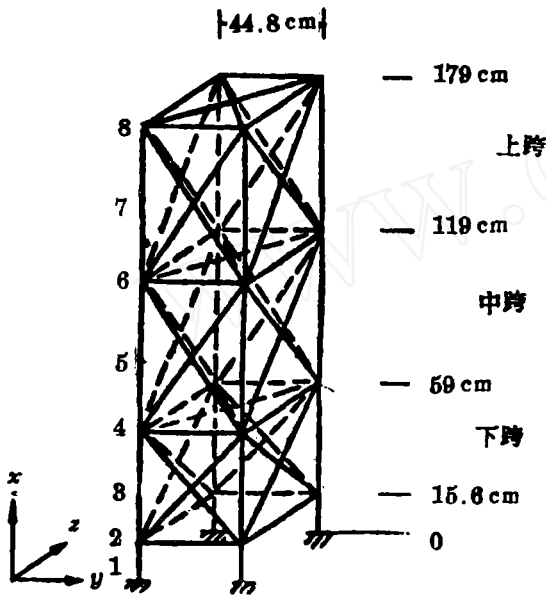


图1 空间框架结构

第10阶至第33阶是整体振动。损伤后整体振动中的前四阶见图3至图7。

从表1可看出基频对损伤很不敏感, 然而第2阶整体振动频率损伤后最大达到减小35%, 第3, 4, 5阶最大达到减小42%, 从第6阶开始又不敏感, 但是下跨损伤各阶频率变化都较

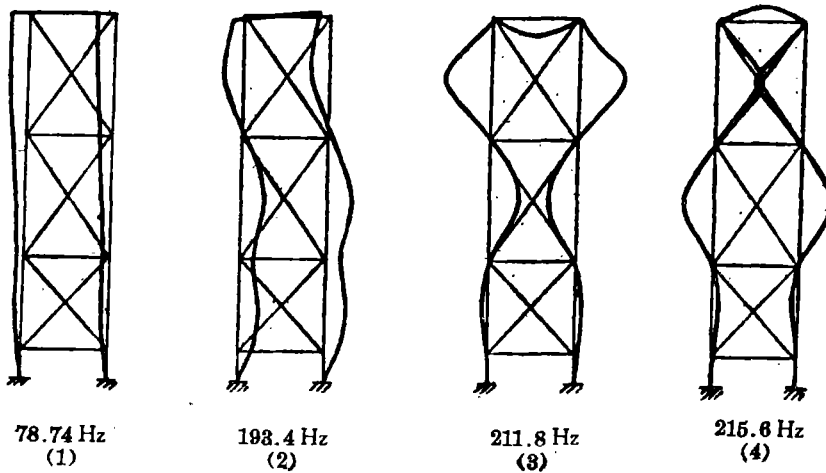


图2 空间框架的整体振动的振型

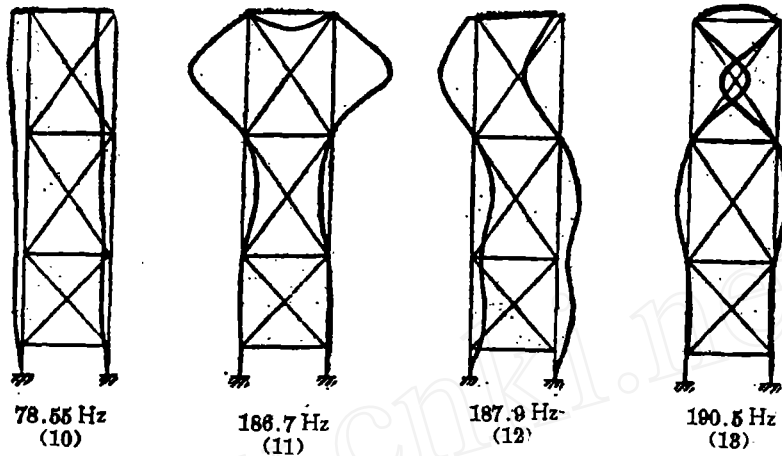


图 3 上跨的下半部损伤 $[(EJ)'] = \frac{1}{2}EJ$ 后前四阶整体振型

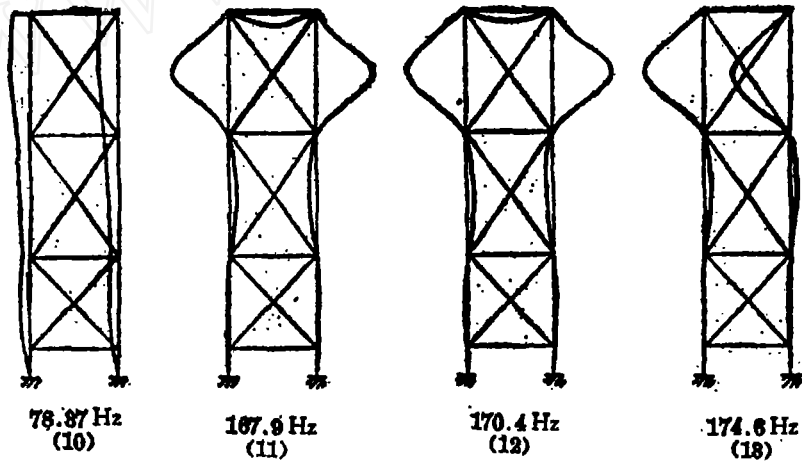


图 4 上跨损伤 $[(EJ)'] = \frac{1}{2}EJ$ 后的前四阶整体振型

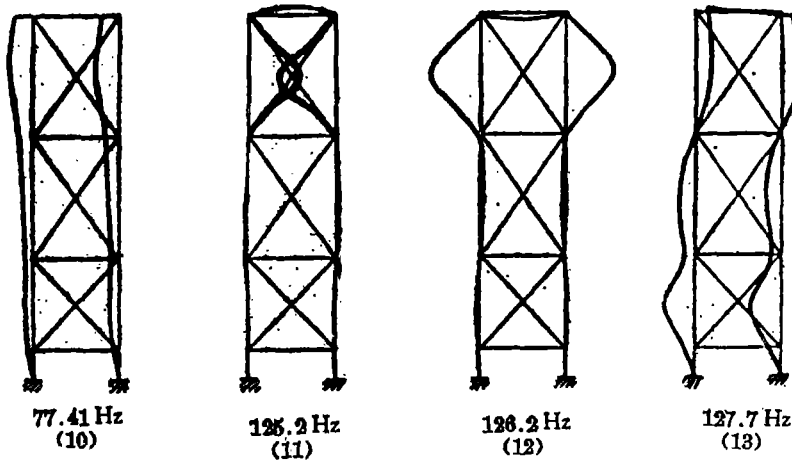


图 5 上跨损伤 $[(EJ)'] = \frac{1}{4}EJ$ 后的前四阶整体振型

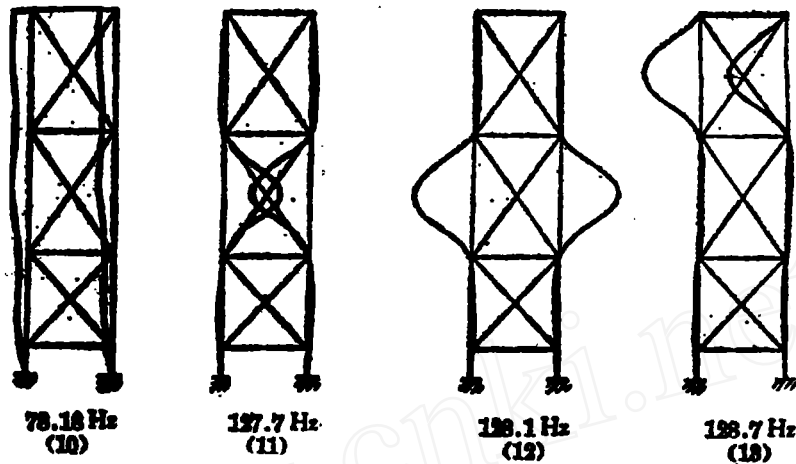


图 6 中跨损伤 $[(EJ)'] = \frac{1}{4}EJ$ 后的前四阶整体振型

表 1 损伤前后各阶固有频率

| 序号 | 无损伤 | 上跨的下半部 $((EJ)') = \frac{1}{2}EJ$ | 上跨损伤 $((EJ)') = \frac{1}{2}EJ$ | 上跨损伤 $((EJ)') = \frac{1}{4}EJ$ | 中跨损伤 $((EJ)') = \frac{1}{4}EJ$ | 下跨损伤 $((EJ)') = \frac{1}{4}EJ$ |
|----|-------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 10 | 78.74 | 78.55 (-0.2%) | 78.37 (-0.5%) | 77.41 (-1.3%) | 78.18 (-0.7%) | 77.76 (-1.2%) |
| 11 | 193.4 | 186.7 (-3.5%) | 167.9 (-13.2%) | 125.2 (-35.3%) | 127.7 (-34.0%) | 184.3 (-4.7%) |
| 12 | 211.8 | 187.9 (-11.3%) | 170.4 (-19.5%) | 126.2 (-40.4%) | 128.1 (-39.5%) | 210.6 (-0.6%) |
| 13 | 215.6 | 190.5 (-12.1%) | 174.6 (-19.0%) | 127.7 (-41.0%) | 128.7 (-40.6%) | 215.4 (-0.6%) |
| 14 | 227.5 | 197.8 (-13.1%) | 175.5 (-22.9%) | 134.1 (-41.1%) | 130.1 (-42.8%) | 225.7 (-0.8%) |
| 15 | 236.4 | 216.1 (-8.6%) | 205.7 (-13.0%) | 200.2 (-15.3%) | 201.8 (-14.6%) | 226.3 (-4.3%) |
| 16 | 242.5 | 234.0 (-3.5%) | 233.1 (-3.9%) | 230.8 (-4.8%) | 218.1 (-10.1%) | 235.2 (-3.0%) |
| 17 | 244.8 | 236.4 | 235.5 | 233.6 | 223.2 | 237.7 |
| 18 | 247.8 | 240.6 | 240.1 | 239.0 | 233.5 | 239.2 |
| 19 | 261.0 | 348.7 | 247.6 | 246.0 | 246.7 | 249.1 |
| 20 | 370.1 | 368.9 | 359.8 | 351.6 | 367.8 | 251.2 |
| 21 | 398.9 | 396.9 | 383.9 | 374.5 | 387.3 | 251.9 |

小, 第 2 阶只减小 4.7%, 这是因为下跨以下的四条腿刚度比较大所致。说明可以用第 2 阶或第 3 阶固有频率来判断损伤, 但不能判断损伤部位。

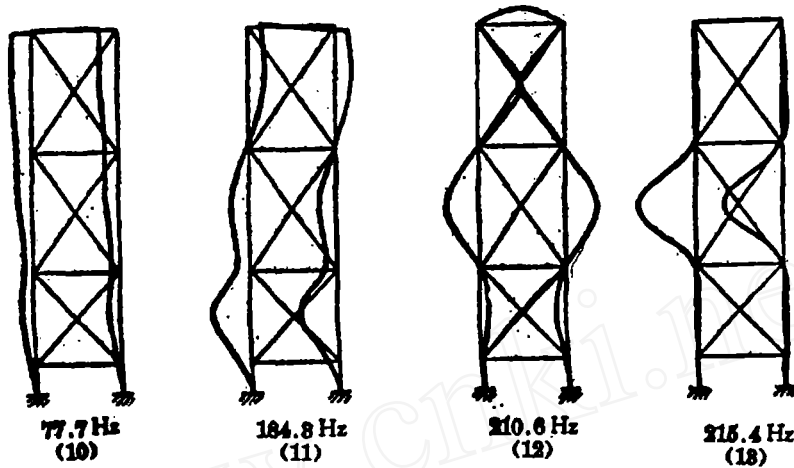


图 7 下跨损伤 $[(EJ)' = \frac{1}{4}EJ]$ 后前四阶整体振型

表 2 损伤前后第 2 阶特征矢量 U_v

| 节点号 | 无损伤 | $(EJ)' = \frac{1}{2}EJ$ | | $(EJ)' = \frac{1}{2}EJ$ | | |
|-----|-----------|-------------------------|----------|-------------------------|-----------|----------|
| | | 上跨的下半部 | 上 跨 | 上 跨 | 中 跨 | 下 跨 |
| 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | -6.63264 | 0.00738 | 0.00441 | -0.00140 | 0.00903 | 6.33588 |
| 3 | -10.36240 | 0.52809 | 0.31846 | -0.09900 | 0.77593 | 18.48640 |
| 4 | -6.29095 | -0.01431 | -0.00985 | 0.00383 | -0.02196 | 5.71099 |
| 5 | -12.38220 | -6.35231 | -4.21754 | 1.56737 | -30.34040 | 8.73947 |
| 6 | -1.06610 | 0.03649 | 0.03306 | -0.01963 | -0.01815 | 0.55266 |
| 7 | 10.5852 | 29.16370 | 29.81450 | -30.30990 | 1.83122 | -8.83996 |
| 8 | 6.25959 | 0.02341 | 0.01892 | -0.01047 | 0.00289 | -6.32238 |

从表 2 看出第 2 阶特征矢量 U_v 在损伤前后的损伤部位有明显的变化。第 1 阶特征矢量 U_v 在五种损伤状态下的变化均很小，而第 2 阶 U_v 对损伤敏感，能判断损伤部位。

三 特征参数检测损伤

空间框架按二维问题计算每个节点三个自由度 (U_1, U_2, U_3)，用特征值对振型正规化，在分析中以特征参数作为检测损伤的参数，特征参数的矢量表达式^[3]

$$\{U_k^*\}_{j,i} = \frac{\{U_k'\}_{j,i}}{\lambda'_{j,i}} - \frac{\{U_k\}_{j,0}}{\lambda_{j,0}} \quad (5)$$

式中 $\{U_k\}$ 和 $\{U_k'\}$ ($K=1,2,\dots,6$) 分别为损伤前后的特征矢量， λ 和 λ' 分别为损伤前后的特征值，下标 j 为第 j 阶模态， i 为损伤部位。

由于空间框架在水平面上具有双对称性质，因此取沿 X 轴方向节点计算五种损伤状态下的特征参数 $\{U_1^*\}$ ， $\{U_2^*\}$ ，和 $\{U_3^*\}$ 。由于空间框架结构比较复杂，计算出的 $\{U_1^*\}$ 和 $\{U_3^*\}$ 的变化比较

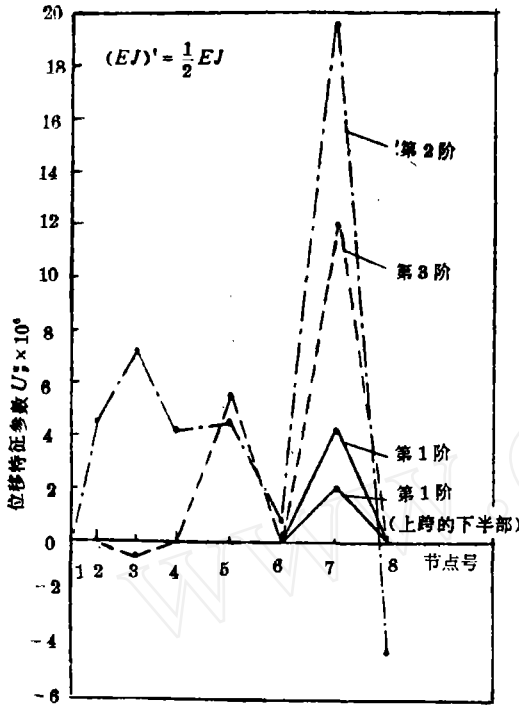


图 8 上跨损伤的第 1, 2, 3 阶的特征参数

复杂无法检测损伤, $\{U_k^*\}$ 的计算值在损伤部位有明显的突变。图 8 描述了上跨的下半部损伤 $[(EJ)' = \frac{1}{2} EJ]$ 后的第 1 阶整体振动的位移特征参数 $\{U_k^*\}$ 和上跨全损伤 $[(EJ)' = \frac{1}{2} EJ]$ 后的第 1 阶、第 2 阶和第 3 阶整体振动的 $\{U_k^*\}$ 。可以看出只在上跨下半部损伤后的第 1 阶模态的 $\{U_k^*\}$ 的规律上和上跨全损伤一样, 只是表示出弱而已。上跨损伤后第 2 阶和第 3 阶的 $\{U_k^*\}$ 值突变均比第 1 阶明显, 尤其是第 2 阶的 $\{U_k^*\}$ 值在损伤部位突变最为明显。图 9 和图 11 描述不同跨依次损伤 $[(EJ)' = \frac{1}{4} EJ]$ 后的 $\{U_k^*\}$, 可看出不同损伤部位出现突变。由于结构本身下跨以下固支部位的刚性比较强, 因此下跨损伤后 $\{U_k^*\}$ 值的突变不十分明显。图 10 和图 12 描述了上跨不同程度损伤后的特征参数 $\{U_k^*\}$, 损伤严重则突变愈明显。而且, 第 2 阶位移特征参数 $\{U_k^*\}$ 对损伤的敏感程度提高了许多。

损伤后特征参数相对于损伤前的变化按下式计算

$$C_K \left[\frac{\{U_k^*\}_{i,i}}{\left(\frac{\{U_k^*\}_{i,0}}{\lambda_{j,0}} \right)} \right] \times 100\% \quad (6)$$

空间框架在不同部位以不同程度损伤后的 C_K 列于表 3。

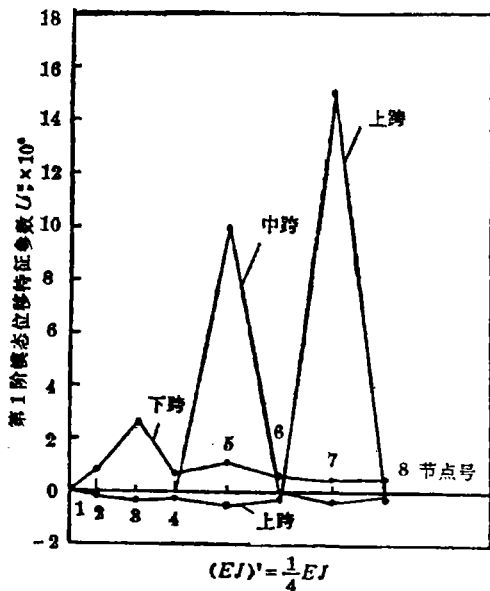


图 9 不同损伤位置的特征参数

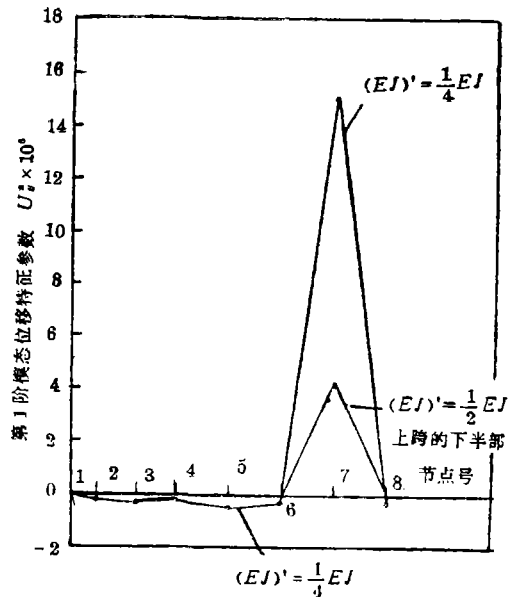


图 10 上跨损伤不同程度的特征参数

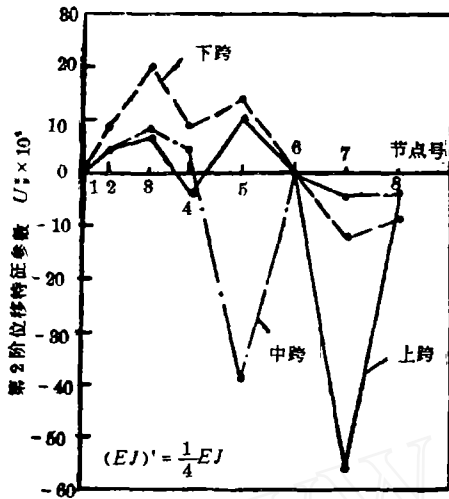


图 11 不同损伤位置的特征参数

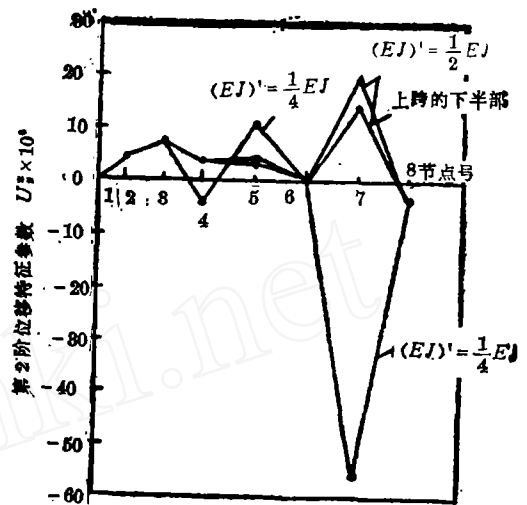


图 12 上跨损伤不同程度的特征参数

表 3 不同损伤位置不同损伤程度位移特征参数的变化

| 节点号 | | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------------------|--------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $(EJ)' = \frac{1}{2} EJ$ | 上跨的下半部 | 第1阶 | -0.18 | -0.19 | -0.15 | +0.04 | -0.10 | +5.28 | -0.05 |
| | | 第2阶 | -100.12 | -105.52 | -100.24 | -44.96 | -103.67 | +204.48 | -99.59 |
| | 上跨 | 第1阶 | -0.35 | -0.35 | -0.29 | -0.45 | -0.17 | +10.89 | -0.11 |
| | | 第2阶 | -100.08 | -103.56 | -99.76 | -54.76 | -102.73 | +285.71 | -99.53 |
| $(EJ)' = \frac{1}{4} EJ$ | 上跨 | 第1阶 | -1.70 | -1.68 | -1.47 | -2.19 | -1.04 | +39.12 | -0.86 |
| | | 第2阶 | -99.86 | -97.70 | +99.85 | -130.20 | -95.61 | -783.17 | -100.40 |
| | 中跨 | 第1阶 | +0.06 | -0.19 | -0.03 | +40.81 | -0.32 | -1.01 | -0.58 |
| | | 第2阶 | -100.31 | -117.34 | -99.20 | +462.10 | -96.09 | -60.31 | -99.89 |
| | 下跨 | 第1阶 | +7.37 | +14.70 | +4.44 | +4.71 | +2.36 | +1.42 | +1.38 |
| | | 第2阶 | -200.3 | -308.82 | -199.53 | -177.80 | -157.07 | -176.15 | -200.97 |

从表3看出损伤后在损伤部位 C_R 的绝对值有明显突变，第2阶的位移特征参数的变化在损伤部位更为明显，因此应该用第2阶位移特征参数检测损伤。

四 模态柔度比法检测损伤

文献^[4]提出的模态柔度比法，假设第 i 跨的模态值为

$$R_i = \phi_{i+1} - \phi_i, \quad R_1 = \phi_2 - \phi_1 \tag{7}$$

第 i 跨的模态柔度比为

$$S_i = \frac{R_i}{R_1} \tag{8}$$

式中 ϕ_i 为第 i 跨的平均模态值。

$$Q_i = \frac{S'_i - S_i}{S_i} \quad (9)$$

根据(9)式计算五种损伤状态下模态柔度比与损伤前的模态柔度比之间的偏差。结果列于表4。

表4 不同损伤位置不同损伤程度模态柔度比的变化

| 模态柔度比变化 | | | Q_1 | Q_3 | Q_5 | Q_7 |
|-------------------------|-------|-----|-------|----------|-----------|-----------|
| $(EJ)' = \frac{1}{2}EJ$ | 上跨下半部 | 第1阶 | 0.00 | -0.81% | -0.71% | -118.41% |
| | | 第2阶 | 0.00 | +118.71 | -508.30 | -6054.26 |
| | 上跨 | 第1阶 | 0.00 | -1.14% | +1.86% | -271.65% |
| | | 第2阶 | 0.00 | +120.21 | -565.60 | -10354.64 |
| $(EJ)' = \frac{1}{4}EJ$ | 上跨 | 第1阶 | 0.00 | -3.96% | +7.44% | -901.48% |
| | | 第2阶 | 0.00 | -120.52 | -664.65 | -33148.39 |
| | 中跨 | 第1阶 | 0.00 | -3.36% | -239.94% | +8.92% |
| | | 第2阶 | 0.00 | +143.02 | -3361.44% | -311.63 |
| | 下跨 | 第1阶 | 0.00 | +188.48% | -17.39% | -6.34% |
| | | 第2阶 | 0.00 | +2.28 | -0.24 | -0.40 |

上表计算中以固支端的平均模态值作 ϕ_i ，依次计算 S_i ，最后算得损伤后的模态柔度比在损伤部位变化很大达到百分之百以上，第二阶模态柔度比在损伤部位的变化相当大，达到十几倍至二十倍。因此用第二阶检测灵敏度可提高很多。

由此可见，特征参数法和模态柔度比法都只使用某一阶模态，这样就产生了选择哪一阶模态最合适？以往都是采用第一阶模态，但在弱损伤状态时灵敏度不高。特征参数法和模态柔度比法用第二阶模态计算出的 $\{U_i\}$ 和 $\{S_i\}$ 在损伤部位的突变则相当明显，敏感度高。

五 结 论

由于这个空间框架在水平面上是方的，又具有双对称性，因此可以按 $X-Y$ 二维问题计算。对复杂结构并不像连续梁那样单一，框架结构的每一构件是连续的，但组合成的框架结构比较复杂，因此对损伤的检测也比较复杂，通过对本结构模型的几种检测方法计算得到如下初步的结论：

1. 损伤前后第一阶固有频率和振型的变化都很小，也就是第一阶模态对损伤很不敏感。但是，第二阶固有频率在损伤后减小13~35%，第三阶固有频率对损伤也敏感；第二阶振型的位移 U_i 在损伤部位的变化范围为145~386%，因此第二阶特征值和特征矢量对损伤敏感，用来检测损伤。

2. 用特征参数和特征参数的变化诊断损伤，损伤部位相对于其他部位的位移特征参数的变化其绝对值有明显的突变，第二阶模型的位移特征参数的突变更为明显，其检测损伤能力高于第一阶模型的特征参数。

3. 模态柔度比法以甲板的平均模态值为基础。计算得到柔度比对损伤较弱的状态, 它的变化不明显。我们以底部的平均模态值为基础, 计算五种损伤状态下模态柔度比的变化都很突出, 达到几倍; 第二阶模态柔度比检测能力更强、更有效, 达到10~20倍。

本文通过对某一结构模型的研究, 提供了一种检测平台损伤的途径, 但这仅仅是初步的研究, 有待今后进一步的深入。

(本文于1989年2月20日收到)

参 考 文 献

- [1] Bathe, K. J., *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, Inc., 1982
- [2] Rubin, S., *Flexibility Monitoring of offshore Jacket Platforms*, 3rd Int. Con. on Behavior of offshore Structure (BOOS' 82) 1982
- [3] Yuen, M. M. F., *Eigenparameter of A Damaged Cantilever*, *Journal of Sound and Vibration*, 1985
- [4] Sunder, S. S., Ting, S. K., *Flexibility Monitoring of Offshore Platforms*, *Applied Ocean Research*, Vol. 7, No. 1, 1985

DETECT DAMAGE ON OFFSHORE PLATFORMS WITH LOW ORDER MORAL PARAMETER

Chen Erying Tian Qianli

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

Research of detecting damage on offshore platforms is more important. In this paper a four storey spatial frame structure is calculated with finite element method, under undamaged and five damaged conditions, eigenvalues and eigenvectors of the first 40 orders have been calculated. Detailed analysis were made with change of the natural frequency and vibration mode of different order, discusses the eigenparameters and modal flexibility ratios for varying damage location and varying degrees of damage.

Although fundamental frequency is less sensitive to damage, but vibration mode of second order and third order is quite sensitive to damage. So, the method has afforded a way of detecting damage on offshore platforms. A preliminary conclusion has been obtained.